オーディオ技術ルネサンス・源への回帰

第4回 物性制御のために

米谷淳一 YONETANI Junichi

現実の回路を構成する部品は，回路図上の表記には現れないものの，すべてがLCRの3つの要素を兼ね備えています．しかし，設計の最初からこれらすべてを考慮しようとすると要素が多く，複雑に入り組んで，取り付く島がなくなってしまいます．そこで，先人たちが，わかりやすいモデル化を行い，要約してきたおかげで，われわれは段階を追って回路設計に習熟することができるようになりました．アンプにおけるそのスタートは，負荷を抵抗体，回路構成部品も抵抗体とみなすことでした．これを足がかりに，順次，来るべき物性を自在に扱う設計へと向かうことができるようになっていました．

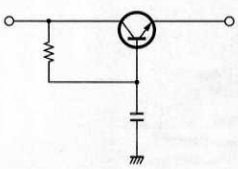
増幅の要素を拡張する

そもそものアンプの働きとは，入力側にある物体の運動を真似ることです．入力信号とはいいますが，その正体は入力側の物体の挙動を表しているものです．物体の運動モデルである，質量，ばね，摩擦は電気用語に翻訳すればL，C，Rです．オーディオにおけるアンプは，主にこのRの増減の働きに着目して応用されています．結果として得られるアンプの出力インピーダンスの大小が，その反映です．しかし，アンプの本質もまた物体の運動そのものなので，その制御対象は，特にRに限る必要はなく，LやCに働きかけてもよいわけです．

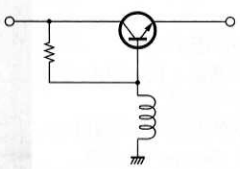
その一例としては電源回路に用いられるリップルフィルター（**図1**）が挙げられます．これはアンプの力を用いて，入力側に接続されたCの容量を等価的に増大させるものです．入力にLをつないでチョークコイルのインダクタンス増大（**図2**）に用いることもできます．当然Rに働きかけることもできます（**図3**）．入力側につながれた物体の運動を増大することができるわけです（**図4**）．入力にLとC両方混ぜてもかまいません．というより現実の回路ではすべてが混ざっています．混ぜた状態の振る舞いが等価的に増大された結果を得ています（**図5**）．（注：ここにL，C，Rの回路記号を書き込んでしまうと，単一の要素の部品が実在しているかのような錯覚に再び陥る危険性を避けるために，ここではそれぞれの素子の挙動を代表する要素というボックスで，それを表記しています）

アンプに可能なのは，このように物体の運動を規定している質量，ばね，摩擦をそれぞれ個別に可変させた結果の運動をさせることができるということです（**図6**）．

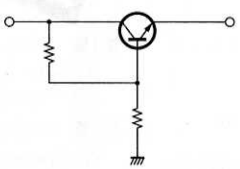
さらにアンプは負帰還だけでは



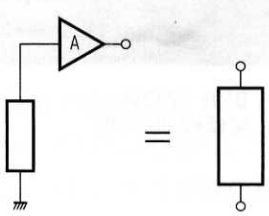
［図1］ 入力をCとしたアンプ



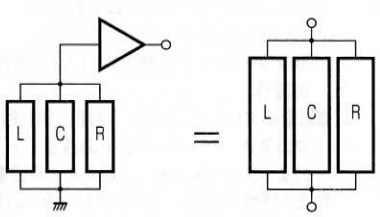
［図2］ 入力をLとしたアンプ



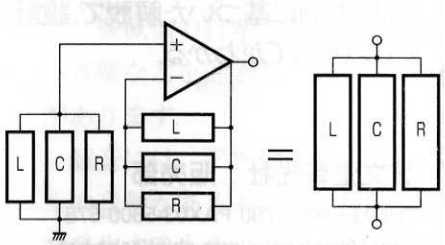
［図3］ 入力をRとしたアンプ



［図4］ アンプの入力につながれた素子の特性を増幅



［図5］ 等価回路



［図6］ 回路上にLCRが存在しているわけではない

なく正帰還という使い方があります．先のリップルフィルターではLやCのバリューの増大に用いられていますが，正帰還を使うことによってバリューを減少させる働きも可能です．実装において，それは期せずしてすべてを備えており（**図7**），回路図上で，あるいは目視で確認できないだけのことです．

アンプの働きとは，入力につながれた物体の運動モデルである，質量，ばね，摩擦をそれぞれ個別に自由に抽出し，それぞれを個別に増減し，さらにそれらの挙動を合成した結果を得ることができるというものです．簡素化されたアンプ設計段階では抵抗増減というたった一つの要素しか扱いませんでしたが，ここでL，C，Rの3つの要素，さらにそれぞれ正負の条件を取り扱うところまで，モデルが拡張されて初めて，現実の物体の運動の制御という最終的な目標に自在に取り組むことが可能になります．

ブートストラップ

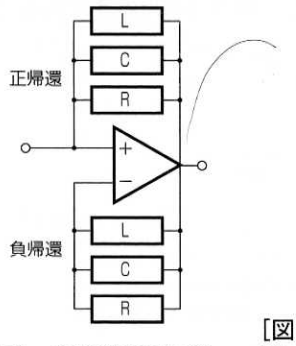
オーディオアンプにおける正帰還の取り扱いについて，一例を挙げておきます．負帰還の応用が主というオーディオ用途のアンプの中に，頻繁に含まれるのがブートストラップと呼ばれる正帰還です．その中でもよく用いられるカスコードブートストラップについて考察するなら，その接続先の交流信号の位相と同相になる正帰還をかけることによってそれは成立するものですが，一般的なカスコード回路の帰還ループを見るとR成分のみに着目（**図8**）されており，ブートストラップをかけられる素子自身のLやC成分の影響による位相変化については，考慮されていないものが多く見受けられます．

同相という原則から外れれば，かえって歪みを（しかも高域になればなるほど）増やしてしまう結果になるので，広帯域なパワーアンプなどでの応用では，かえって危険度が高くなります．これを最適化するには位相補正回路を含んだブートストラップ回路（**図9**）が必要になります．

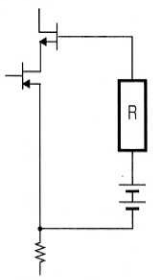
先に挙げたように，一般のアンプ回路ではR成分にのみ着目し，負帰還量で歪みを一挙に軽減する手法に頼っているため，正帰還の扱いが掴みにくくなっているのかもしれません．

線形領域

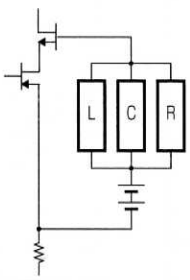
FET（**図10**）にブートストラップを与えてV_{DS}を固定する場合，その動作ラインは垂直に引かれます．これをFET素子の線形領域（**図11**）に入るように動作ラインを設定すると，直線性が変化する（**図12**）のを確認できます．V_{DS}を可変して低歪みなスポットを探すことができます．広帯域で低歪みな増幅回路，それを用いた発振器などの能動素子に，これらの手法を用いると特性を改善することができるでしょう．ただ，今回提案している上下対称差動回路では，個々の増幅素子毎に一対のブートストラップ回路が必要になり，そのV_{DS}セットも別々に行わなければならないので，回路規模も大きくなり，調整も煩雑ではあります．



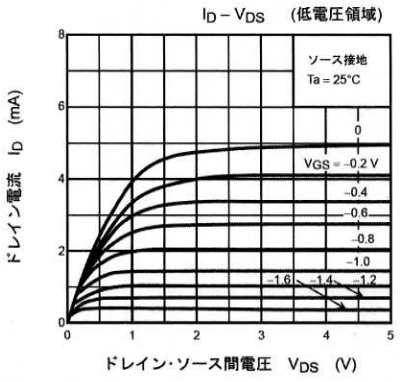
［図7］ 負帰還と正帰還



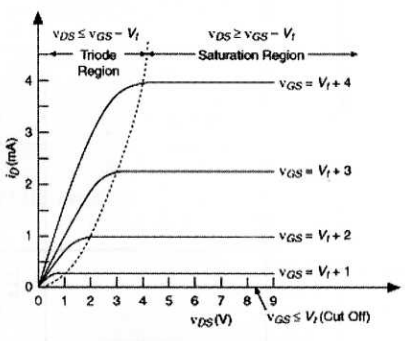
［図8］ カスコード回路の着目点



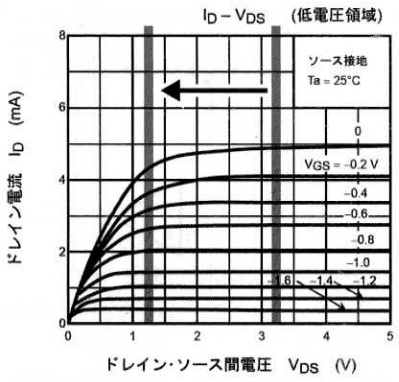
［図9］ 実際のカスコード回路



［図10］ ドレイン電流対ドレイン・ソース間電圧特性



［図11］ 線形領域と飽和領域



［図12］ FETの直線性の変化

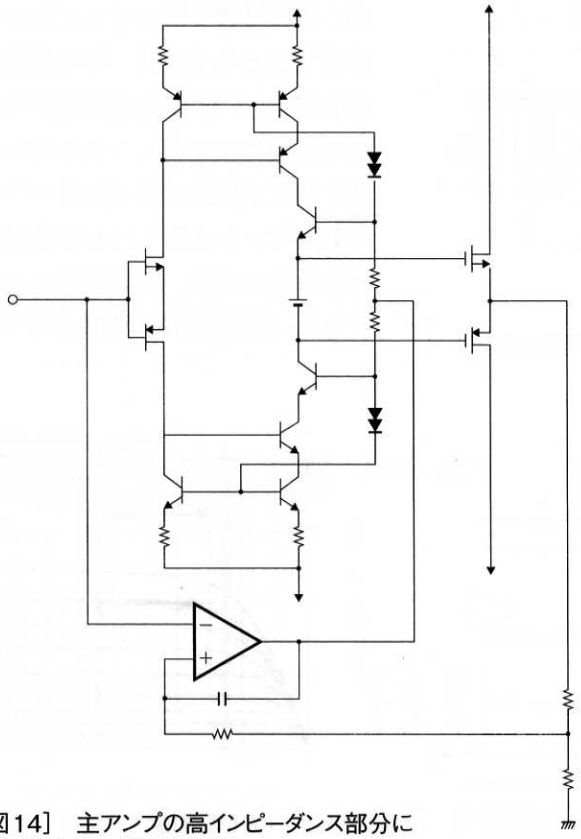
[図13] 半導体パラメーターを簡便に測定できる半導体アナライザーの例
(秋月電子通商扱い)

ドリフト

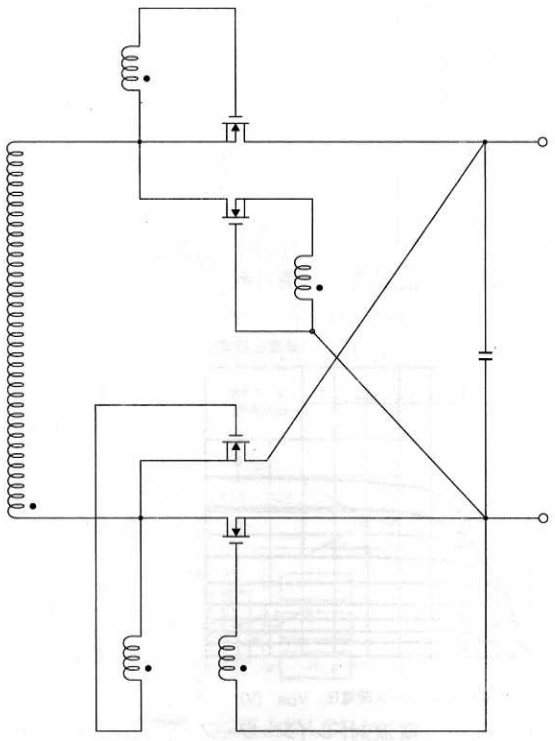
差動増幅の原則どおり，差動対となる素子に特性の揃ったマッチドペアを与え，動作環境が同一になるように熱的に密な結合を行い，FETであるならばI_{dss}をQポイントにセットすることで低減することが基本となります．近年容易に素子のパラメーターを計測できるハンディ機器（**図13**）も発売されているので，これを用いて大まかに選別します．

しかし実動時のパラメーターは計測条件下とは異なることが多いので，最後は実機に仮差しして所望のペアを選び，選別したマッチドペア同士をCPU用の放熱ペーストで密着させ，足を覆うように素子ごとキャップでカバー（放熱とは相反するので素子温度が高くなりすぎないように留意）するのを一つの方法として提案します．

回路動作中に出力の直流電位を計測しながら，回路内に息を吹き込むとドリフトが観測されること



[図14] 主アンプの高インピーダンス部分に小電流のサーボ信号を送る



[図15] 周期整流回路の例